POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

L’integrazione di tecniche fotogrammetriche e MMS nel rilievo metrico dei Beni Culturali

Original
L’integrazione di tecniche fotogrammetriche e MMS nel rilievo metrico dei Beni Culturali / Calantropio, A., Matrone, F., Lingua, A.M.. - ELETTRONICO. - 23:(2019), pp. 157-164. (#ASITA2019 Trieste 12-14 Novembre 2019).

Availability:
This version is available at: 11583/2766273 since: 2019-11-12T13:00:07Z

Publisher:
Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

06 September 2026

L'integrazione di tecniche fotogrammetriche e MMS nel rilievo metrico dei Beni Culturali

Alessio Calantropio ([a]), Francesca Matrone ([b]), Andrea Maria Lingua ([b])

([a]) Politecnico di Torino – DAD – Dipartimento di Architettura e Design, Corso Massimo D'Azeglio, 42 - 10125 – Torino (TO), 011 090 4380, *alessio.calantropio@polito.it*
([b]) Politecnico di Torino – DIATI – Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 – Torino (TO), 011 090 7700, *francesca.matrone@polito.it, andrea.lingua@polito.it*

Abstract
I recenti sviluppi dei metodi e delle tecniche di rilievo metrico nel campo della Geomatica prediligono sempre più l'integrazione di dati ottenuti da diversi sensori. Le tecniche *range-based* da un lato e quelle *image-based* di fotogrammetria dall'altro si rivelano complementari ogni qualvolta sia richiesta una documentazione metrica specifica, con un'elevata accuratezza e un alto livello di dettaglio.
Negli ultimi anni, si è assistito a un consolidamento della tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) e a una sua crescente diffusione. Con lo scopo di valutare le potenzialità e le criticità dei sistemi che impiegano tale tecnologia, in questo contributo si intende confrontare alcuni set di dati acquisiti, con differenti modalità e sensori, in contesti di rilievo speditivo di beni culturali. Nello specifico, è stato testato il dispositivo Kaarta STENCIL, dotato di un sistema di scansione a base fissa, i cui prodotti sono stati confrontati, in termini di congruenza geometrica e di densità, con quelli ottenuti dal laser scanner terrestre FARO Focus 120 (CAM2), utilizzato come *ground truth*.
Inoltre, noti i limiti dei sistemi *range-based* nell'acquisizione di dati radiometrici di qualità idonea ai processi di texturizzazione, i dati da questi ottenuti sono stati integrati con quelli acquisiti da fotogrammetria terrestre e aerea (aventi sensori più performanti): ciò ha quindi permesso di associare la componente radiometrica fotogrammetrica a quella geometrica ricavata dal sistema SLAM.
Ulteriore test effettuato è stato l'utilizzo delle immagini generate simultaneamente all'acquisizione MMS (*Mobile Mapping System*) e ottenute dalla camera *feature tracker* (integrata nel dispositivo Kaarta STENCIL): si è proceduto dapprima all'orientamento del dataset di immagini, successivamente a un confronto tra la posizione dei centri di presa stimati e la traiettoria di acquisizione dello strumento e, infine, alla proiezione delle immagini, precedentemente orientate, sul modello ricavato da tecnica MMS.
Si è pertanto dimostrato che è possibile un'efficace integrazione delle tecnologie *image-based* con quelle *range-based*, ottenendo dati idonei al rilievo speditivo dei beni culturali.

Introduzione

L'esperienza presentata in questo articolo ha per oggetto la valutazione delle strategie di integrazione di dati spaziali, acquisiti in contesti di rilievo speditivo mediante l'utilizzo di sistemi MMS (*Mobile Mapping Systems*). In particolare, l'obiettivo principale di questo lavoro consiste nell'analisi comparativa del sensore Kaarta STENCIL, con lo scopo di definire la qualità e la congruenza metrica dei prodotti generati. La moderna tecnologia del Kaartaè stata dunque confrontata con le più consolidate tecniche *range-based* (Terrestrial Laser Scanning) e *image-based* (fotogrammetria *UAV* e *close-range*), con il fine di valutare la qualità e la congruenza metrica dei prodotti ottenibili.
Noti i limiti dei sistemi *range-based* nell'acquisizione di dati radiometrici di elevata qualità, una delle possibili strade da intraprendere, al fine di arricchire e valorizzare il dato acquisito, consiste nell'integrazione dei dati derivanti da sensori definiti come "*laser-visual-inertial odometry sensors*" con quelli ottenuti da fotogrammetria terrestre e aerea (dotati di sensori CMOS RGB più performanti). Le recenti metodologie nel campo del rilievo metrico tendono infatti sempre più a favorire l'integrazione di sensori di diverso tipo (Balletti, et al., 2015), in grado di effettuare acquisizioni simultanee o differite. La possibilità di integrare tra loro dati di diversa natura permette di sfruttare le peculiarità e, al contempo, ridurre gli svantaggi dei vari sensori impiegati e delle differenti tecniche utilizzate. Tali strategie, che prevedono un approccio di rilievo metrico multisensore, possono essere utili soprattutto nel settore dei beni culturali, dove una documentazione ricca, densa e accurata a supporto delle iniziali fasi di conoscenza del bene può facilitare i successivi processi di restauro, conservazione o salvaguardia (Sammartano & Spanò, 2018).

Il caso studio

Con lo scopo di valutare potenzialità e criticità del sistema Kaarta STENCIL, è stata condotta una campagna di rilievo metrico integrato con oggetto il caso studio del Sacro Monte di Varallo (VC): un complesso architettonico di natura religiosa, composto da 45 cappelle costruite a partire dal XV secolo e inserito nella *World Heritage List*, come patrimonio UNESCO, nel 2003. I test riportati in questo contributo hanno avuto come oggetto la cappella n. 10 del complesso (rappresentante la fuga in Egitto), una cappella a pianta ottagonale costruita nell'ottavo decennio del Cinquecento.

Descrizione dei sensori impiegati e metodologia adottata

La tecnologia proprietaria di Kaarta (simile alla tecnologia SLAM) è stata integrata con un sensore LiDAR 3D, una camera per la correlazione delle *feature* ed una piattaforma inerziale per generare mappe in tempo reale senza l'utilizzo di un GPS. Non si tratta dunque della tradizionale SLAM, ma di una soluzione definita come *laser-visual-inertial odometry based* (Zhang & Singh, 2018).
La valutazione del sensore è avvenuta mediante un approccio comparativo, rilevando il manufatto architettonico utilizzando, oltre alla già citata piattaforma MMS, un laser scanner terrestre FARO Focus 120 (CAM2), una Camera DSLR (*Digital Single-Lens Reflex*) Nikon D800 E (dotata di un ottica da 24 mm), e un drone Phantom 4 PRO (DJI). Le principali caratteristiche dei sensori impiegati sono riportate in figura 1. L'acquisizione multisensore ha permesso di definire 2

dataset utilizzati come *ground truth*: i dati acquisiti dal laser scanner terrestre sono stati utilizzati per la validazione della congruenza geometrica del dato *range-based* acquisito dal Kaarta, mentre i dati acquisiti dai sensori fotogrammetrici, aereo e terrestre, sono stati utilizzati per l'analisi qualitativa della componente radiometrica dei prodotti generati utilizzando la *feature tracker camera* integrata nello strumento Kaarta STENCIL.

Strumento		Caratteristiche	
Kaarta STENCIL		*Range operativo*	*1-100 m*
		Errore di raggio	*+- 30 mm*
		FOV verticale/orizzontale	*30°/360°*
		Velocità di acquisizione	*300.000 pt/s*
Feature tracker camera		*Sensore*	*1/3" CMOS*
		Pixel effettivi	*1,3 MP*
		Distanza focale	*3,4 mm*
		Risoluzione immagini	*1280x1024*
FARO Focus 120 (CAM2)		*Range operativo*	*0,6-130 m*
		Errore di raggio	*+- 2 mm*
		FOV verticale/orizzontale	*305°/360°*
		Velocità di acquisizione	*976.000 pt/s*
NIKON D800 E		*Sensore*	*1,7" CMOS*
		Pixel effettivi	*36,2 MP*
		Distanza focale	*24 mm*
		Risoluzione immagini	*7360x4912*
DJI Phantom 4 PRO		*Sensore*	*1" CMOS*
		Pixel effettivi	*20 MP*
		Distanza focale	*8,8 mm*
		Risoluzione immagini	*5472x3648*

Figura 1 – Immagini e caratteristiche salienti dei sensori utilizzati.

Analisi ed elaborazione dei dati

Le acquisizioni sono state precedute dall'applicazione sul manufatto rilevato di 12 marker a scacchiera (8 impiegati come punti di controllo e 4 come punti di verifica durante la successiva elaborazione fotogrammetrica) e da un rilievo di dettaglio effettuato mediante stazione totale. Le acquisizioni e le elaborazioni dei dati sono avvenute secondo le consuete prassi operative del rilievo metrico; in particolare le informazioni riguardanti l'acquisizione e l'elaborazione dei dati acquisiti sono riportate sinteticamente nelle tabelle illustrate in figura 2 e 3.

	Kaarta STENCIL	FARO Focus 120 (CAM2)
Dimensione scansione	5.316.626	28.713.998
Numero scansioni	1 [1]	6 [2]
Errore medio	35 mm	4 mm
Deviazione standard	53 mm	3 mm

[1] Lunghezza traiettoria: 112 m [2] Densità di scansione: 1 punto ogni 6 mm a 10 m

Figura 2 – Confronto tra le caratteristiche dei dataset generati a partire dai dati ottenuti dal Kaarta STENCIL e dal FARO Focus 120 (ground truth).

	Feature tracker camera	Fotog. Aerea eterrestre
Immagini allineate/totali	190/191	197/212
Tie points	25.083	113.426
GSD	8,6 mm/pix	2,2 mm/pix
Residui Check Points [4]	44 mm	7 mm
Residui Control Points [8]	16 mm	4 mm

Figura 3 – Confronto tra le caratteristiche del dataset generato a partire dai dati ottenuti dalla feature tracker camera del Kaarta STENCIL e del dataset fotogrammetrico aereo e terrestre (ground truth). Dati elaborati mediante l'utilizzo del software Agisoft Metashape.

I tempi di acquisizione ed elaborazione dati, per ciascun *dataset*, sono invece riportati sinteticamente nella tabella illustrata in figura 4.

	FARO Focus 120	Kaarta STENCIL	Feature tracker camera	Fotogrammetria aerea e terrestre
Tempo di acquisizione	00:54:00	00:03:33	00:03:33	00:25:00
Tempo di elaborazione	02:00:00	00:01:00	00:09:00	06:48:00 [1]
[1] Tempi relativi ad allineamento immagini e generazione nuvola densa.				

Figura 4 – Tempi di acquisizione e di elaborazione per i vari dataset elaborati.

Analisi della componente geometrica

Una prima analisi è stata svolta al fine di confrontare gli scostamenti tra le nuvole di punti generate nei quattro dataset (figura 5). Per il confronto Kaarta-LiDAR, le nuvole state sovrapposte mediante algoritmo ICP (*Iterative Closest Points*) (Besl & McKay, 1992), per il confronto dei dataset fotogrammetrici invece i modelli sono stati georiferiti mediante i marker precedentemente rilevati con stazione totale.

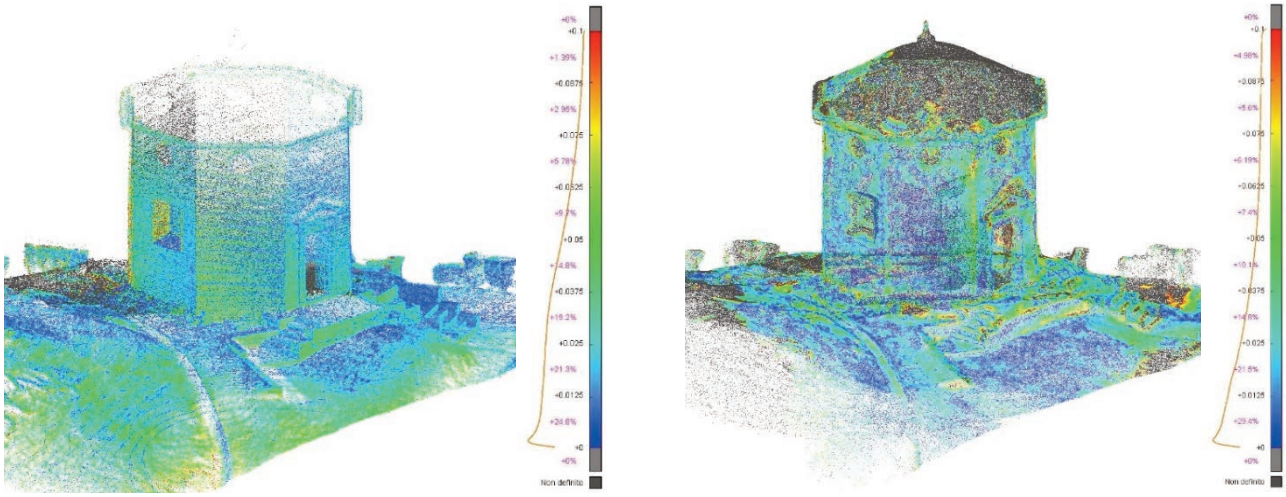


Figura 5 – A sinistra: analisi C2C tra le nuvole di punti generate a partire dai dati degli strumenti range-based (Kaarta STENCIL e FARO Focus 120*) A destra: analisi C2C tra le nuvole di punti generate a partire dai dati degli strumenti image-based (Feature tracker camera e dataset fotogrammetrico aereo/Terrestre).*

Dal confronto si evince che, come atteso, il dataset del sensore con tecnologia *laser-visual-inertial odometry* permette di ottenere un modello con una congruenza geometrica superiore rispetto a quella del modello fotogrammetrico. È stato inoltre interessante confrontare la traiettoria di acquisizione del Kaarta con i centri di presa delle immagini acquisite dalla camera dellostrumento stesso, stimati a seguito dell'orientamento del blocco fotogrammetrico (figura 7). Lo scostamento atteso tra le due traiettorie era di 15 cm (distanza effettiva dai centri dei due sensori); le due traiettorie sono risultate congruenti prevalentemente all'inizio e alla fine dell'acquisizione, mentre sono apprezzabili scostamenti alla metà del percorso di acquisizione.

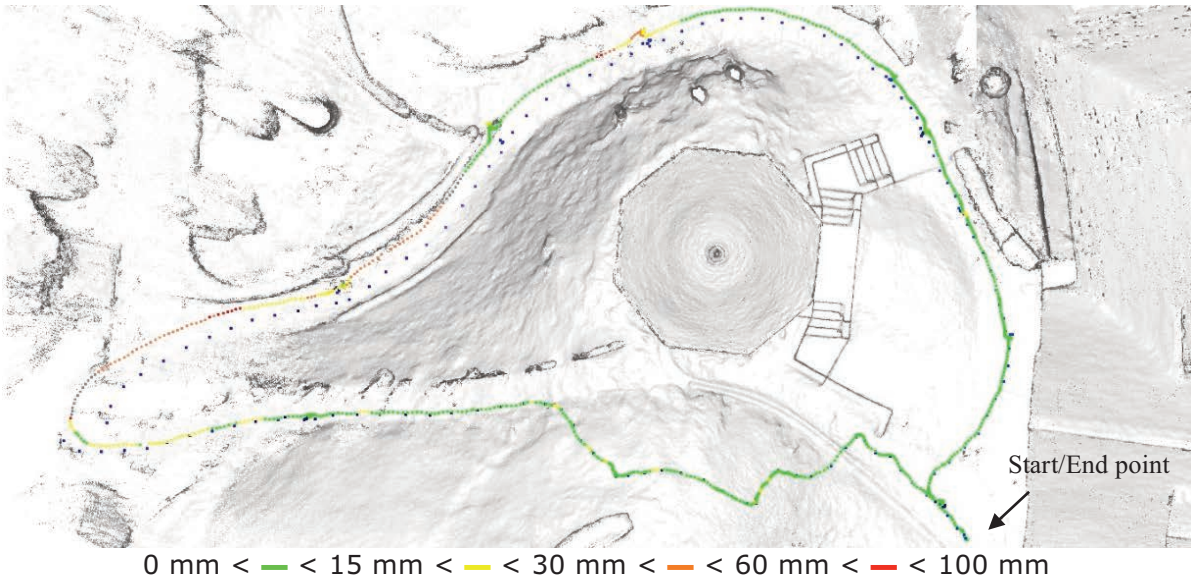


Figura 6 – Confronto tra la traiettoria del percorso di acquisizione restituito dallo strumento Kaarta STENCIL (in scala di colore) e le posizioni dei centri di presa stimati delle immagini acquisite dalla feature tracker camera. Il colore della traiettoria corrisponde alla distanza relativa riportata in legenda.

Le analisi di densità sono state eseguite mediante il conteggio dei punti contenuti in una sfera avente raggio di 5 cm e centro in ciascun punto di un campione di 1 m^2 di superficie muraria della cappella 10 (indicata con un riquadro rosso in figura 7). Le analisi sono riportate in dettaglio nella tabella illustrata in figura 8.

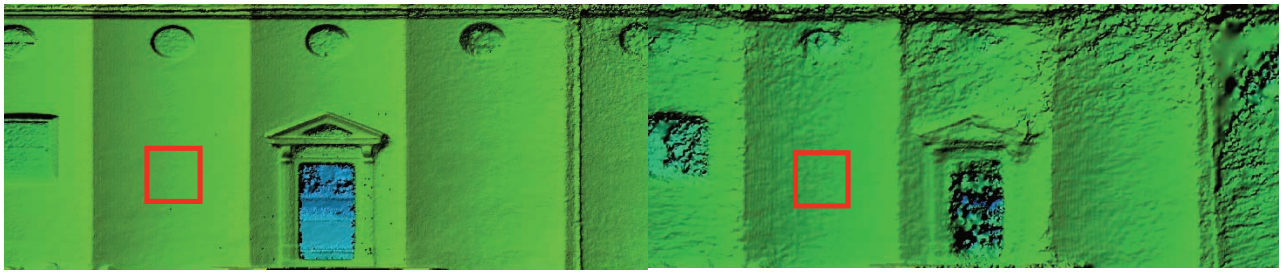


Figura 7 – Confronto tra due DSM (Digital Surface Model) di una porzione della cappella 10, generate a partire dal dataset fotogrammetrico aereo/terrestre (sinistra) e dal dataset della feature tracker camera (destra). In rosso, la porzione della superficie muraria (campione unitario di 1 m^2) oggetto delle analisi riportate in dettaglio in figura 8.

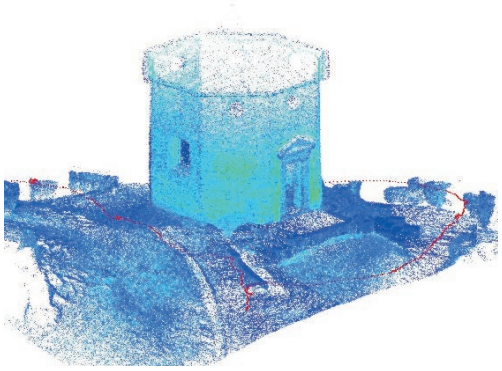
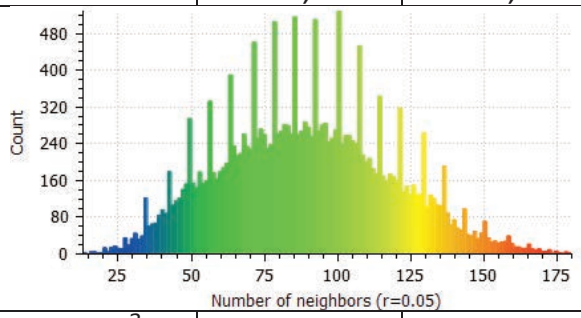
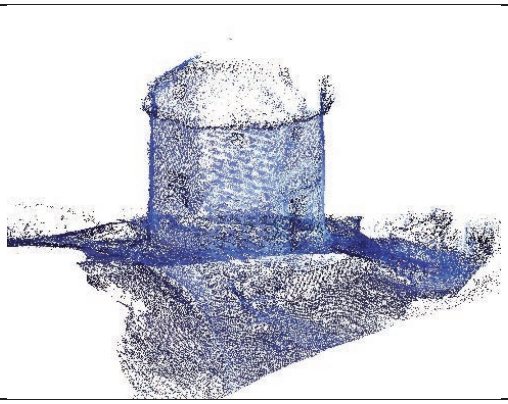
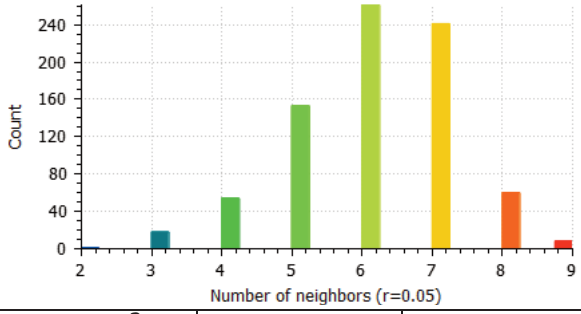
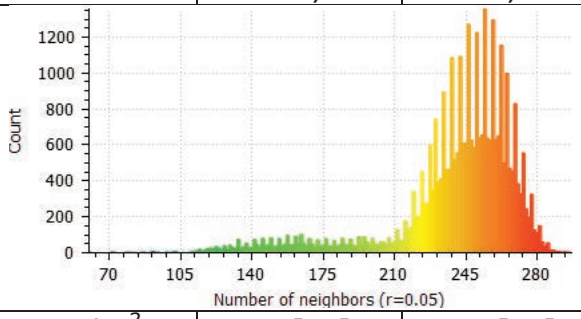
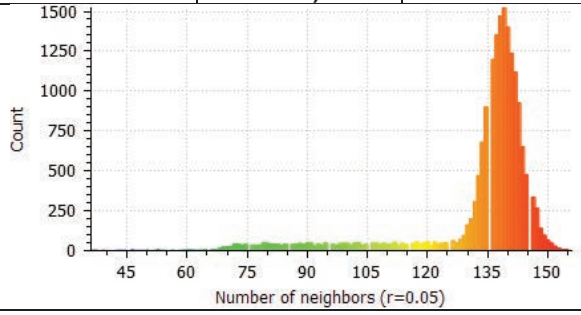
	Modello 3D (nuvola di punti densa)	Analisi di densità sul campione unitario (1 m^2) della nuvola		
Kaarta STENCIL		*Pt/m^2*	μ [pt]	σ [pt]
		20896	*89,4*	*28,9*
				
Feature tracker camera		*Pt/m^2*	μ [pt]	σ [pt]
		796	*6,1*	*1,2*
				
FARO Focus 120 (CAM2)		*Pt/m^2*	μ [pt]	σ [pt]
		31863	*240,7*	*30,9*
				
Fotogrammetria aerea e terrestre		*Pt/m^2*	μ [pt]	σ [pt]
		17723	*133,4*	*16*
				

Figura 8 – La tabella illustra, per ciascun dataset, il modello 3D generato e i risultati ottenuti a seguito delle analisi sul campione unitario (1 m^2) relative alla densità della nuvola di punti, con i valori di media e deviazione standard.

Analisi della componente radiometrica

È stata condotta un'analisi qualitativa delle caratteristiche cromatiche dei prodotti 3D generati a partire dai dataset fotogrammetrici elaborati; in un primo momento si è proceduto alla generazione di due ortofoto (in proiezione cilindrica) della medesima porzione della cappella rilevata (figura 9), successivamente l'analisi qualitativa ha interessato un dettaglio della decorazione muraria realizzata in affresco sulla porzione di interesse (figura 10). Infine, il modello 3D generato a partire dai dati acquisiti dal Kaarta STENCIL è stato colorato, interpolando rispettivamente il dato RGB proveniente dal *dataset* fotogrammetrico aereo/terrestre e dal *dataset* della feature tracker camera utilizzando un'apposita funzione del software CloudCompare (figura 11).

I risultati evidenziano come sia possibile attribuire un valore RGB alla nuvola di punti ottenuta con tecnica SLAM, a partire sia dai fotogrammi acquisiti con altri sensori fotogrammetrici, sia dalle immagini acquisite con la camera dello strumento stesso. La congruenza cromatica della nuvola di punti ottenuta da quest'ultimo può essere migliorata con un'eventuale calibrazione radiometrica e una diversa pianificazione della geometria di presa, al fine di ricostruire in maniera più coerente l'oggetto rilevato. Considerando che per il dataset fotogrammetrico della feature tracker camera, a una distanza media di acquisizione di 9 m è stato ottenuto un GSD di circa 8 mm, è importante non eccedere tale distanza.

Figura 9 – Confronto tra due ortofoto (proiezione cilindrica) di una porzione del modello della cappella 10, generate a partire dal dataset fotogrammetrico aereo/terrestre (sinistra) e dal dataset della feature tracker camera (destra). In rosso, la porzione della superficie muraria riportata in dettaglio in figura 10.

Figura 10 – Particolare di una porzione dell'ortofoto della cappella 10, si nota la maggiore risoluzione del dettaglio derivato dal dataset aereo/terrestre (sinistra) rispetto a quello derivato dal dataset della feature tracker camera (destra).

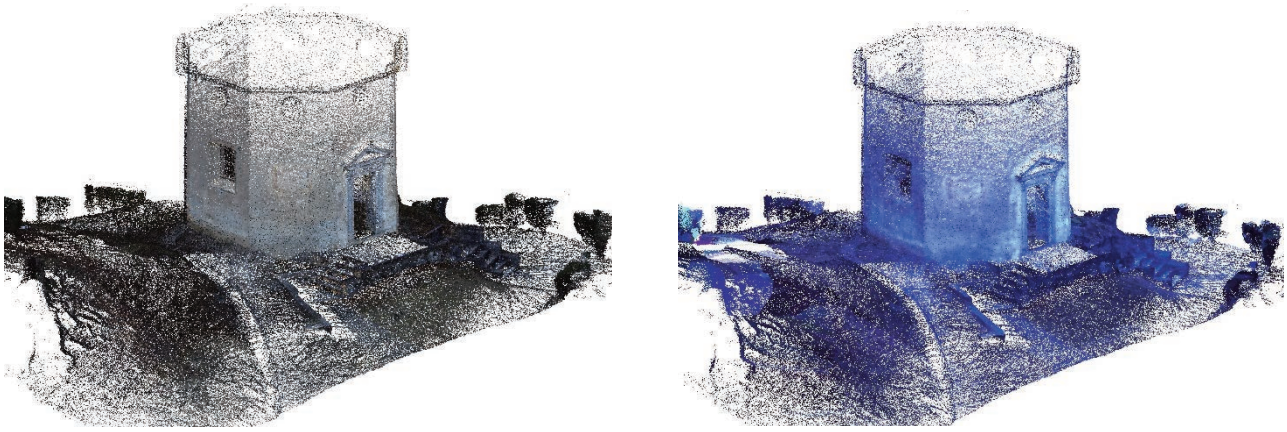


Figura 11 – Modello 3D (nuvola densa) generato a partire dai dati acquisiti dal Kaarta Stencil, colorato rispettivamente interpolando il dato RGB proveniente dal dataset fotogrammetrico aereo/terrestre (sinistra) e dal dataset della feature tracker camera (destra).

Considerazioni e conclusioni

A valle di questa esperienza è stato pertanto possibile valutare la possibilità di integrazione dei dati ottenuti da piattaforme MMS con prodotti derivanti da fotogrammetria terrestre e aerea, i quali, solitamente, dispongono di sensori RGB più performanti. Dai test effettuati utilizzando il sensore fotogrammetrico integrato nel Kaarta STENCIL è emerso che, al fine di garantire l'integrità del dato radiometrico associabile alla nuvola di punti generata mediante tecnica SLAM, è necessario procedere con la correzione del colore mediante la creazione di profili; l'utilizzo di una lente a correzione cromatica o l'utilizzo di una camera (esterna) più performante risultano altresì alternative valide alla correzione del dato post-acquisizione.

Sfruttare il dato RGB interpolabile da una nuvola fotogrammetrica risulta inoltre limitante e dispendioso in termini di tempo e risorse; l'utilizzo del dato cromatico derivante direttamente da un set d'immagini orientate nello spazio, al fine di integrare direttamente la componente radiometrica della nuvola SLAM, potrebbe sicuramente essere un'alternativa più rapida, ovviando alla necessità di dover generare una nuvola densa fotogrammetrica.

Riferimenti bibliografici

Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. In: *Applied Geomatics,* 10(4), 317-339.

Zhang, J., & Singh, S. (2018). Laser–visual–inertial odometry and mapping with high robustness and low drift. In: *Journal of Field Robotics*, 35(8), 1242-1264.

Balletti, C., Guerra, F., Scocca, V., Gottardi, C., 2015. 3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 215.

Besl, P. J., & McKay, N. D., 1992. Method for registration of 3- D shapes. In: *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, Vol. 1611, pp. 586-607. International Society for Optics and Photonics.